

J-PARC 3 GeV シンクロトロン 1 MW 運転状況

RESULTS OF 1-MW OPERATION IN J-PARC 3 GEV RAPID CYCLING SYNCHROTRON

山本風海^{#,A)}, 山本昌亘^{A)}, 山崎良雄^{A)}, 野村昌弘^{A)}, 菅沼和明^{A)}, 藤来洗裕^{A)}, 神谷潤一郎^{A)}, 畠山衆一郎^{A),B)}, 發知英明^{C)}, 吉本政弘^{A)}, 仲野孝幸充^{A)}, 田村文彦^{A)}, Saha Pranab^{A)}, 金正倫計^{A)}

Kazami Yamamoto^{#,A)}, Masanobu Yamamoto^{A)}, Yoshio Yamazaki^{A)}, Masahiro Nomura^{A)}, Kazuaki Suganuma^{A)}, Kosuke Fujirai^{A)}, Junichiro Kamiya^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{A),B)}, Hideaki Hotchi^{C)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}, Takamitsu Nakanoya^{A)}, Fumihiko Tamura^{A)}, Saha Pranab^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}

^{A)} Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

^{C)} Accelerator Division, J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) is aiming to provide the proton beam of very high power for neutron experiments and the main ring synchrotron. We have continued the beam commissioning and the output power from RCS have been increasing. In recent years, just before the summer shutdown period, we have been trying continuous supply of 1-MW high-intensity beam, which is the design value, to a neutron target. First trial was 1-hour continuous operation in July 2018, and second trial was 10-hours continuous in July 2019. In both cases, we achieved almost stable operation. Furthermore, in June 2020, we tried to operate continuously for over 40 hours. But in this case, some trouble occurred and the operation was frequently suspended. Through these continuous operation trials, we have identified issues for stable operation of 1 MW. In this presentation, we will report the results of 1-MW continuous operation and issues obtained from these results.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン(3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, RCS)は物質生命科学実験施設(materials and life science experimental facility, MLF)および主リング(Main Ring, MR)に最大 1MW 相当のビームを供給する目的で建設された[1]。J-PARC では 2014 年夏季にイオン源の増強を行い、リニアックは設計性能のピーク電流 50 mA での運転が可能となった[2]。RCS でも夏の保守作業期間に大強度ビームを受け入れるための準備作業を進め、作業後に設計最大出力である 1 MW 相当の出力を達成すべく調整を開始した。調整の初期段階において、1 MW 相当の加速粒子数での運転時に、高周波加速空洞の電源出力が不足し、RF バケツが維持できずビームが加速途中で失われる事が判明した。そのため、空洞共振点を変更し必要な電流値を下げる、電源出力の余裕分を使用しインターロックの値を見直す、等の対応を行い、年明けの調整運転時に 1 MW 相当の試験運転に成功した[3]。その後、供用運転としても段階的にビーム出力を増加しながら、1 MW の連続運転試験を断続的に行ってきた。本稿では、これまで実施してきた 1 MW 連続運転試験の結果および一連の試験によって判明した課題について報告する。

2. 定常運転と 1 MW 連続試験

図 1 に、2015 年 1 月から 2020 年 7 月末までの RCS

の出力(加速粒子数)の履歴を示す。近年、RCS は大きなトラブルもなく、安定に MLF に向けて 500 kW を超える出力のビームを供給している[4]。MLF では 2015 年に一旦 500kW で利用運転を開始したものの、短期間に 2 回ターゲット容器が破損する事象が発生した[5]。2 度の交換によって予備のターゲットが無くなり、以降改良版ターゲットの製作と交換が完了するまで、200 kW 以下の低出力での運転を余儀なくされた。このように、大強度ビームはターゲットに大きな影響を与えるため、万が一ターゲットが損傷した場合を考慮し、1 MW の連続試験はユーザー利用運転に影響しないよう、利用運転が終了し、夏季保守作業を開始するまでの間、6 月末から 7 月頭に

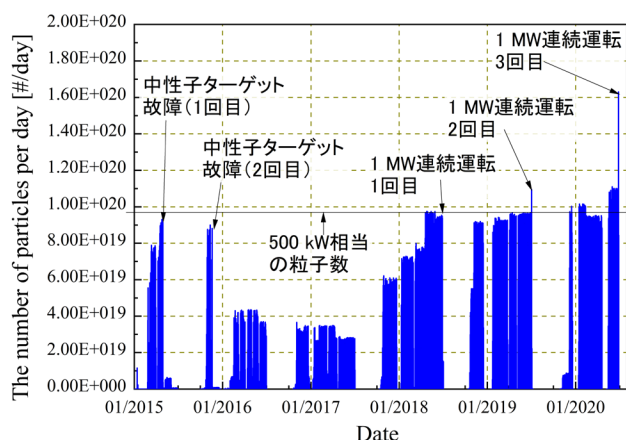


Figure 1: Accelerated particles per day.

[#] kazami@post.j-parc.jp

かけて実施している。RCS では、これまで3回にかけて1 MW の連続運転試験を実施してきた。最初の試験は2018年7月に行われた。2回目の試験は2019年7月に、また3回目の試験は2020年の6月末に実施した。以下、各試験時の結果をまとめる。

3. 1 MW 連続試験

3.1 1回目(2018/7/3 13:30-14:30)

1回目の1 MW 連続運転試験は、2018年の7月3日、13:30 から14:30 までの1時間に行った。この試験時の電流モニタの出力を図2に、ビーム損失モニタの出力を図3に示す。

この時点で、RCS の1 MW 運転パラメータの調整はか

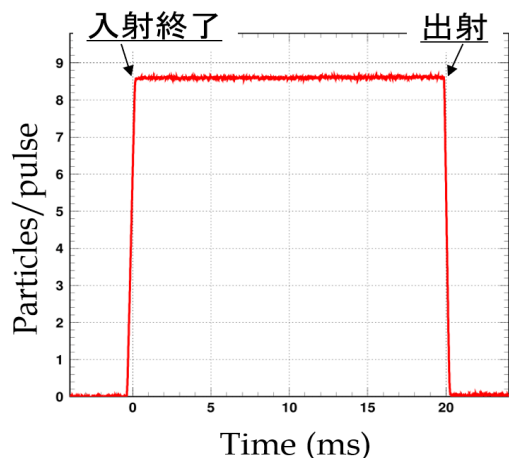


Figure 2: Beam current monitor signal.

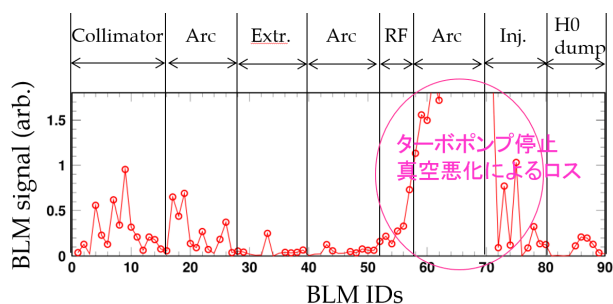


Figure 3: Beam loss monitor signals.

なり進んでおり、図2に示す通り入射終了から取出しまで電流モニタではっきりとわかるようなビーム損失は発生していない。一方で、加速器の全周に配置したビーム損失モニタでは、特に加速の後半のタイミングでアーク部を中心に非常に大きな信号が検出された(図3赤丸内)。実のところ、この1回目の連続運転試験の1週間ほど前に、図3の大きなビーム損失信号が検出されたアーク部に設置されたターボ分子ポンプが故障し、大気が流入するという事象が発生していた。そのため、このターボ分子ポンプ周辺の真空容器内面には流入したガスが吸着してしまい、1 MW 相当の出力で25Hzの連続運転を行うと最大3桁以上の圧力上昇が発生した(図4)[6]。圧力上昇が最も顕著であったのは、故障したポンプの直近で、そこから遠ざかるにつれて圧力上昇の割合も下がっていった。この傾向は、ビーム損失モニタの信号の応答と一致している。このことから、ビーム損失モニタの信号は陽子ビームとガスの相互作用によって発生した散乱粒子が原因であると考えられる。

図5に、運転終了後の機器表面での残留線量の値を示す。図中の左の値が500 kW 利用運転中の保守日に測定した結果、右の値が1回目の1 MW 連続運転後に測定した結果となっている。図中の赤丸の範囲がビーム損失信号が大きく出た領域だが、線量は全く上昇しなかった。これは、ビーム損失信号は実際の陽子ビームがダクトに衝突した際の放射線を測定しているのではなく、主に散乱されたガスイオンや電子がダクトや他のガスと

Red (left):500 kW user operation: Meas. 20th Jun
Blue (right):1 MW, 1 hour trial: Meas. 4th Jul.

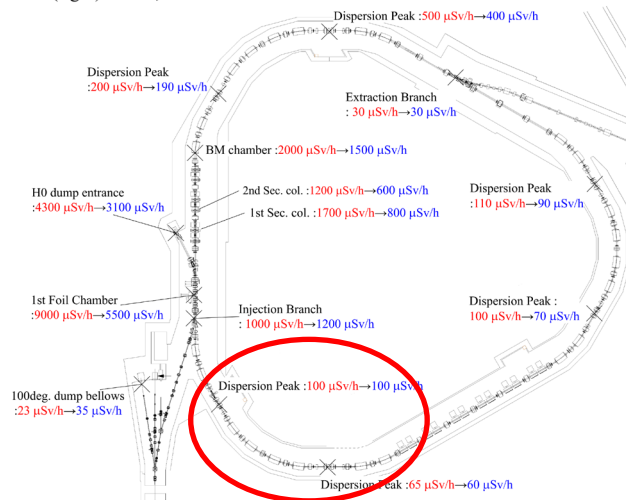


Figure 5: Residual dose in the RCS tunnel.

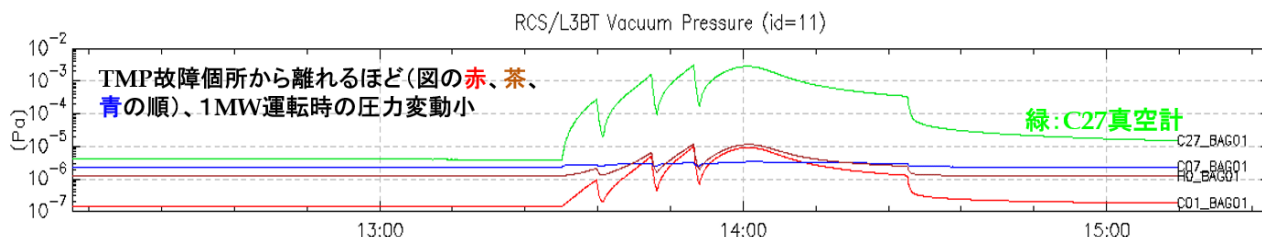


Figure 4: Vacuum trend during 1 MW continuous operation.

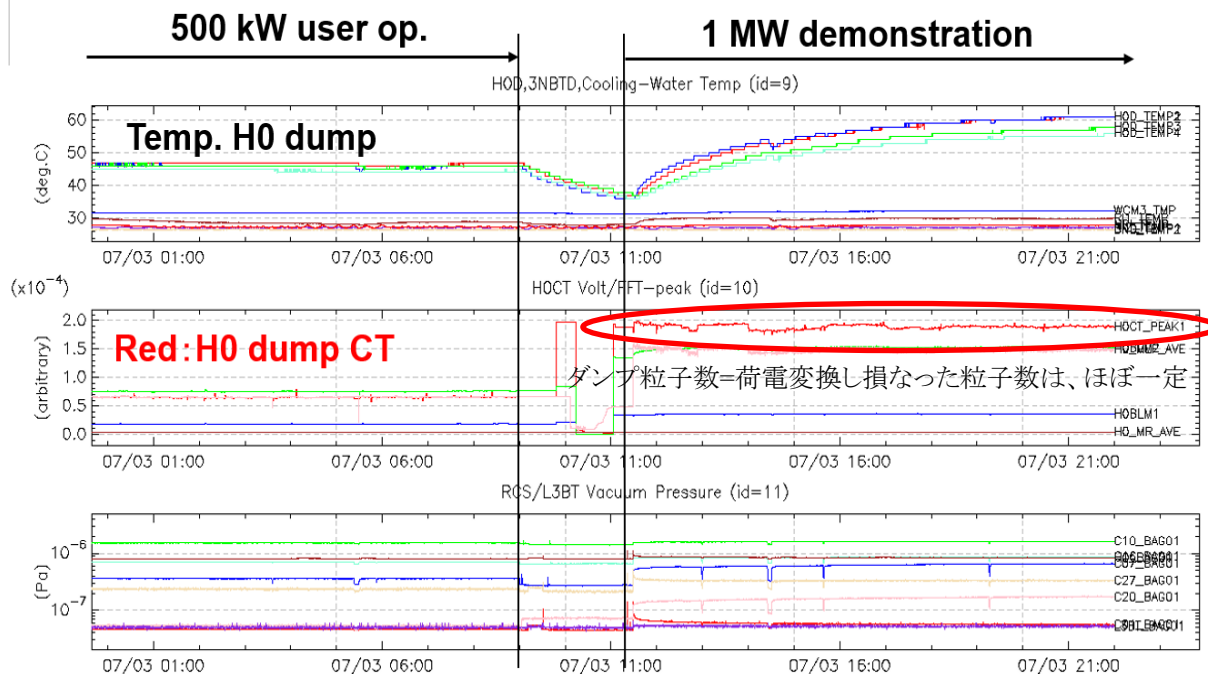


Figure 6: RCS parameter trend during 1 MW continuous operation at second trial.

衝突した際に発生する制動放射を検知していたためと思われる。

またこの際には、連続運転を開始して早々に高周波電源の過電流が頻発した。電流超過が著しい高周波空洞の負荷を他の空洞に分散することで、インターロックの発報を抑制することができたが、高周波空洞に 1 MW 以上のビーム電流での運転を行う余裕がほとんどないことが判明した。

3.2 2 回目 (2019/7/3 10:30-22:00)

2 回目の連続運転は、2019 年の 7 月 3 日の 10:30 から 22:00 まで 10 時間半にわたって行われた。2 回目の試験時には、直前に真空機器でのトラブルもなかったため、1 MW 相当の出力で 25Hz で運転しても圧力上昇は 500kW 運転時と比較して数倍の増加で落ち着いた。それ以外の機器も安定で、連続運転中インターロックでの停止は 3 度だけで、それもリニアックの RF 空洞の放電に起因するものであった。RCS では、1 MW 相当の入射および周回ビームとの相互作用により、入射で使用するフォイルの荷電変換効率が急激に悪化するのではないかと、との懸念があったが、実際にはそれも見られず入射効率はほぼ一定であった。荷電変換し損なった H^0 や H^- を廃棄する入射ダンプの温度も、10 時間でほぼ飽和し 60 度を超える程度で、十分許容範囲内であった。図 6 に、1 MW 10 時間半連続運転時の各パラメータのトレンドを示す。また、この運転後の残留線量は、冷却時間が通常の 500kW 運転時の測定より長かったとはいえ、それを考慮しても十分想定範囲内に抑えられており、ビームロスの観点からは 1 MW の連続運転は可能であることが確認できた。

3.3 3 回目 (2020/6/25 10:00-6/27 12:00)

2020 年 6 月末、25 日 10:00 から、さらなる長時間の

安定性確認のため、約 2 日間の連続運転を試みた。この連続運転を開始した直後に、RF 空洞終段増幅器内のコンデンサおよび真空管の故障が発生し、12 時間程度ビーム運転を止めることとなった。このため、当初予定より短縮されたものの、運転期間を延長することで 36 時間の連続運転を行うことができた。連続運転開始直後に発生したコンデンサと真空管の故障は経年劣化によるものと考えられ、1 MW の運転が直接大きな影響を与えた訳ではないと考えている。

この連続運転試験において、フォイルの耐久性、真空圧力の上昇については、36 時間の連続運転においても問題無いことが確認できた。しかし一方で、外気温が上昇すると冷却水の供給温度が制御できなくなり、終段増幅器真空管の温度インターロックが発報することが判った。RCS の冷却水システムは、図 7 に示すように熱源である電磁石や空洞を直接冷やす一次系と、熱交換器を介して排熱する二次系から構成されており、二次系の熱は開放型冷却塔によって気化熱として放熱される。このため、外気温(より正確には湿球温度)が上がると冷却塔での冷却効率が下がるため、一次冷却水の供給温度を

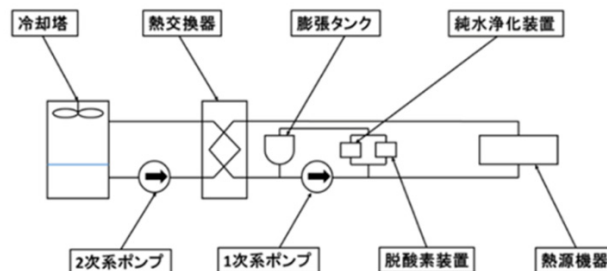


Figure 7: Schematic view of the RCS cooling water system.

一定以下に保てなくなり、機器の温度が上昇しインター

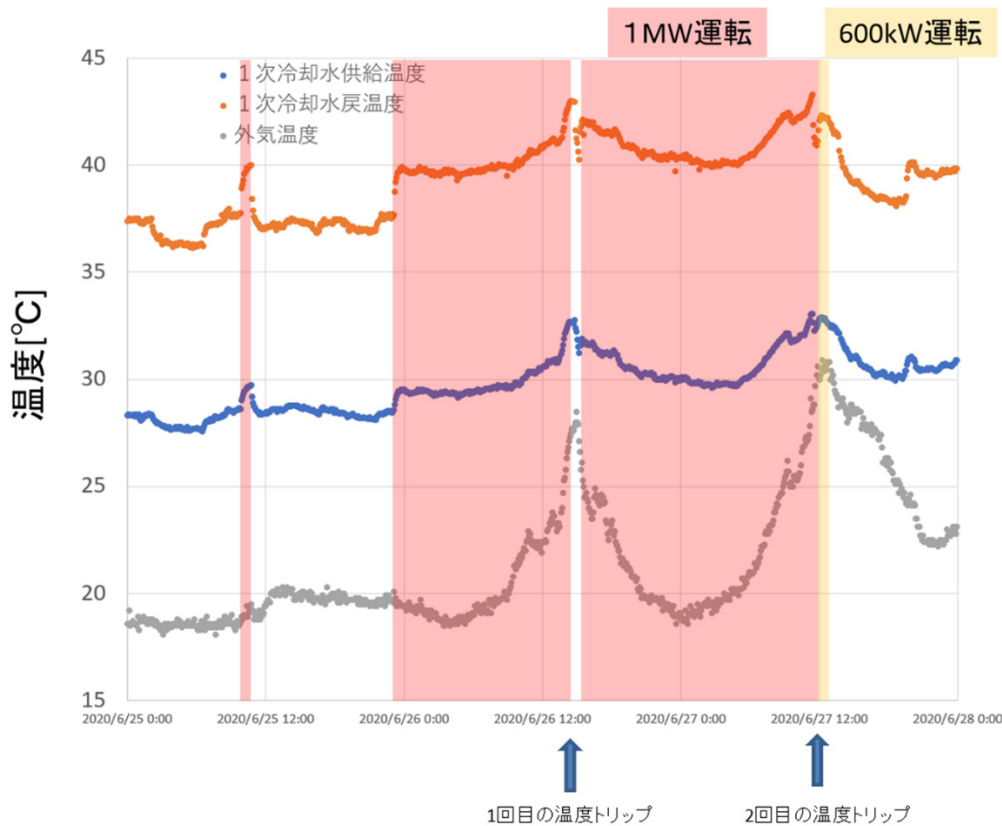


Figure 8: Trend of cooling water temperature.

ロックが発報しやすくなる。

図 8 に、試験中の外気温と冷却水温度の変化を示す。図中の赤く塗られた時間帯が 1 MW 連続運転を示している。6 月 25 日の 10:00 から 1 時間もたたないうちに RF 空洞終段増幅器のトラブルが発生し、復帰したのが夜 23 時頃であったことから、翌朝までの夜間の運転では冷却水供給温度は 30 度以下で安定していた。ところが、6 月 26 日の昼は外気温が上昇し、それに伴って冷却水の供給温度も上昇した。電磁石や空洞からの発熱量は一定であるので、戻り温度も同様に上昇し、最終的に 14 時過ぎに RF 空洞終段増幅器内の真空管の冷却水戻り温度のインターロックが発報しビームが停止された。この際には、インターロックの発報した空洞 11 号機の電圧振幅を下げ熱負荷を下げる措置を行い、さらに外気温がピークを過ぎて冷却水供給温度が自然に下がったため、1 MW の連続運転を再開することができた。そのまま翌日まで連続運転を続けたが、6 月 27 日は前日にもまして気温が上昇し、午前 11 時の時点で前日とは別の空洞の真空管で温度インターロックが発報した。2 回目の発報の状況は、前日と違いまだ外気温のピークを迎えていない時間帯であったため、インターロックを発報した号機の電圧を下げてもまたすぐ別の空洞で発報することが予想された。また、今回の連続運転は利用運転の一環として実施しており、まだビーム利用を希望するユーザーがいた。これらの点を考慮し、1 MW の出力を諦め、600 kW に下げて停止時間の 13 時まで運転した。運転後、4 時間冷却期間を置いて残留線量を測定したが、値はおおむねパワーに比例して上昇しており、予想に反して線量が急上

昇するような個所は無かった。

4. まとめと今後

J-PARC RCS は、運転開始よりビーム調整および各機器の改良を着実に進めてきた。その結果、単パルスでの試験ではビームロス許容できるレベルまで抑えることに成功し、現在は利用運転に向けた連続運転試験を継続している。一連の連続試験の結果、安定に 1 MW 出力で利用運転を行うには、以下の点の改善が必要であることが判明した。

- 高周波加速空洞の高度化
空洞の投入電力については、1 MW の単パルス試験の初期段階ですでに不足していることが判明し、電源容量の増強で何とか 1 MW の加速ができるようになった状況である。この状況を改善すべく、より消費電力の低い共振周波数での運転を達成するためにフィードバックシステムの導入[7]を行ったが、今度は真空管を駆動する半導体アンプの容量が不足する事態となった。現在は、より高出力の半導体アンプの開発や、真空管への負荷を減らした運転パラメータの検討などを行い、少しでも余裕ができるように改善を進めている。また、より大掛かりな改善案として、新たな構造の空洞の検討[8]も進めている。
- 冷却水システムの増強
3 回目の連続運転試験から、夏前特に気温と湿度が上がる日には、現状の冷却水システムで冷却能力が不足することが明確になった。この問題

の解決には、以下の方法がある。

- (1) 1次系の循環水量を増加させる。
- (2) 1次系の冷却水温を低下させる。
- (3) 機器側の冷却構造を改善させる。

このうち(1)については、地下にある1次系冷却水設備室はすでに機器で埋まっており、これ以上の増強は不可能である。(2)については、2次系の増強、もしくは3次系の増設といった方向が考えられるが、規模の大きな工事となるので、費用対効果や工期の観点で比較検討を進めている。(3)については、大掛かりな機器の見直しについては上記新たな構造の空洞の検討に含まれる。また直近での対策としては、真空管の冷却水配管の減圧弁の余裕を無くし、開放度を上げて流量を増やす、冷却水のバランスを微調し、熱負荷の大きな個所に冷却水を集中させる、等の調整を行い、どこまで対応できるか試験する予定である。

また、これまでの連続運転試験においては、荷電変換フォイルの劣化は認められなかったが、フォイルの破損メカニズムについてはまだ理解が進んでおらず、また自作フォイルの再現性も良くなく品質が安定していないので、今後も1 MW出力での連続運転を通して特性評価と性能向上を進める必要がある。一方で、中性子ターゲットの損傷評価の観点からは、一定のビーム出力で運転を継続する方が、より正確にビーム強度に対する標的の損傷度合いを見積もることができる。この観点から、ターゲット開発グループから1 MW連続運転時間について要望が出ており、今後はターゲット開発の観点も含めて試験について調整し実施していく予定である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., “Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC”, KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [2] 森下卓俊他, “J-PARC リニアックのアップグレード”, 加速器, 12, 1, 22-30 (2015), 高エネルギーニュース, 33 (4), 270-278 (2015).
- [3] 山本風海他, “J-PARC 3 GeV シンクロトロンでの 1 MW 出力の達成”, 高エネルギーニュース, 34 (1), 19-28 (2015).
- [4] K. Yamamoto *et al.*, “Reliability of J-PARC accelerator system over the past decade”, Proceedings of the 3rd international symposium on science at J-PARC, Tsukuba, Japan, Sep. 23-26, 2019(to be published).
- [5] J-PARC ANNUAL REPORT 2015;
<https://j-parc.jp/researcher/ja/database/report/index.html>
- [6] K. Yamamoto *et al.*, “Operation Status of J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19), Melbourne, Australia, May. 19-24, 2019, pp. 2020-2023.
- [7] F. Tamura *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 22, 092001 (2019).
- [8] M. Yamamoto *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. 1067 (2018) 052014.